

УДК 66.021

МАССООБМЕННАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ УДАРНО-РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ НАСАДКИ

Андреев Матвей Викторович¹,
nir@angtu.ru

Бальчугов Алексей Валерьевич¹,
balchug@mail.ru

Дубровский Дмитрий Александрович²,
dubrovskiyda@inbox.ru

Коробочкин Валерий Васильевич³,
vkorobochkin@tpu.ru

¹ Ангарский государственный технический университет,
Россия, 665835, г. Ангарск, ул. Чайковского, 60.

² ИЦ-УКК ОАО «Ангарская нефтехимическая компания»,
Россия, 665830, г. Ангарск, а/я 65.

³ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность работы обусловлена необходимостью интенсификации массообменных процессов в газожидкостных системах для уменьшения габаритов промышленных аппаратов и снижения вредных выбросов в окружающую среду.

Цель работы: экспериментально определить объемные коэффициенты массопередачи при десорбции диоксида углерода из воды в поток воздуха на новой ударно-распылительной насадке при различных приведенных скоростях газа и плотностях орошения и на основе полученных данных выполнить сравнение эффективности ударно-распылительной насадки с известными насадками.

Методы исследования: экспериментальное определение объемных коэффициентов массопередачи с использованием уравнений материального баланса и массопередачи, прямое титрование, инструментальное определение расходов газа и жидкости.

Результаты. Получена база экспериментальных данных по объемным коэффициентам массопередачи при десорбции диоксида углерода из воды в широком диапазоне приведенных скоростей газа и плотностей орошения на новой регулярной ударно-распылительной насадке. Установлено, что зависимость объемного коэффициента массопередачи на ударно-распылительной насадке от плотности орошения имеет экстремальный характер. Возникновение максимумов объясняется свойствами гидродинамических режимов, при которых обеспечивается развитая поверхность контакта фаз и высокая интенсивность массопереноса. Показано, что в зависимости от плотности орошения и приведенной скорости газа на ударно-распылительной насадке возникают четыре гидродинамических режима: струйный; распылительный; ударно-распылительный и режим захлебывания. Показано, что при приведенной скорости газа 1,21–1,56 м/с объемный коэффициент массопередачи на ударно-распылительной насадке в 2,49–3,33 раза превышает объемный коэффициент массопередачи на насадке ГИАП НЗ (эквивалентный диаметр $d_p=0,038$ м). Это объясняется созданием в новой насадке высокоэффективного ударно-распылительного гидродинамического режима. Показано, что новая ударно-распылительная насадка является перспективной для проведения газожидкостных процессов в химических производствах.

Ключевые слова:

Массоперенос, десорбция диоксида углерода из воды, ударно-распылительная насадка, интенсивность массопереноса, объемный коэффициент массопередачи.

Введение

Насадочные аппараты нашли широкое применение для проведения массообменных процессов между газом и жидкостью в различных областях химической и нефтехимической технологии [1–3]. Тип насадочного контактного устройства определяет интенсивность массопереноса и эффективность работы аппарата в целом [4–6]. Совершенствованию известных конструкций насадок посвящен ряд работ, целью которых являлось повышение поверхности контакта фаз [7], увеличение массообменной эффективности насадок [8–10] и улучшение гидродинамических характеристик [11–13]. В большинстве работ массообменная эффективность насадки характеризуется объемным

коэффициентом массопередачи, показывающим, какое количество компонента перешло через границу раздела фаз в единицу времени в 1 м^3 насадки, отнесенное к движущей силе процесса [14, 15]. В патенте [16] для проведения газожидкостных массообменных процессов предложена новая ударно-распылительная регулярная насадка с многоступенчатым контактом газа и жидкости. В отличие от известных насадок [4], использующих ударно-распылительный принцип контакта газа и жидкости, новая насадка компактна, характеризуется простотой конструкцией и развитой поверхностью контакта фаз, формируемой в объеме насадки. Представляется актуальным определить массообменную эффективность новой ударно-распыли-

тельной насадки. Сравнение интенсивности массопереноса на насадках различных типов часто выполняют на примере системы «диоксид углерода – вода», как адекватно воспроизводимой модели [17–19]. В настоящей работе поставлена цель экспериментально определить объемные коэффициенты массопередачи при десорбции диоксида углерода из воды в поток воздуха на новой ударно-распылительной насадке при различных приведенных скоростях газа и плотностях орошения и на основе полученных данных выполнить сравнение эффективности ударно-распылительной насадки с известными насадками.

Результаты и их обсуждение

Схема ударно-распылительной насадки и схема потоков газа и жидкости в слое насадки представлены на рис. 1. Насадка состоит из вертикальных гофрированных листов двух видов (1 и 2), установленных попеременно. На вершинах гофр листа 1 имеются плоские горизонтальные площадки 3, а на вершинах гофр листа 2 – щели. Гофры листа 2 выполнены перфорированными с площадью свободного сечения 22 %. В собранном виде гофрированные листы образуют горизонтальные ромбовидные (квадратные) каналы (ступени) и вертикальные каналы зигзагообразной формы для прохождения газа и жидкости.

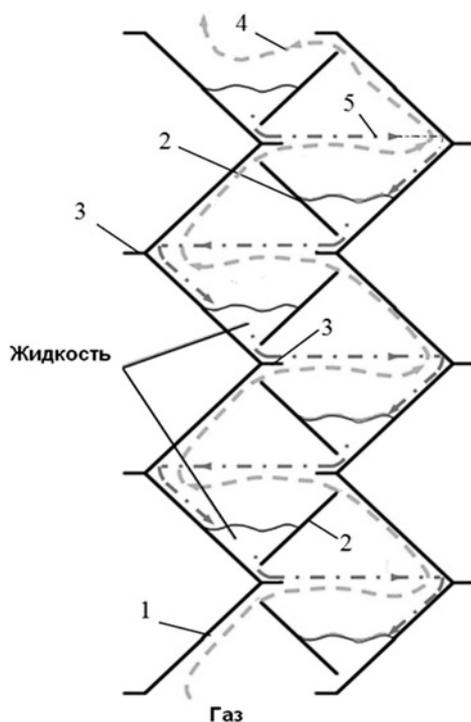


Рис. 1. Схема потоков газа и жидкости на ударно-распылительной насадке: 1, 2 – гофрированные листы; 3 – горизонтальная площадка; 4 – поток газа; 5 – поток жидкости

Fig. 1. Diagram of gas and liquid flows in the shock-spray packing; 1, 2 are the corrugated sheets; 3 is the horizontal platform; 4 is the gas flow; 5 is the fluid flow

Жидкость в насадке стекает сверху вниз, заполняя нижнюю часть ромбовидных (квадратных) каналов и исполняя роль гидрозатвора. Плоские струи жидкости, стекая с горизонтальных площадок 3, распыляются потоком газа. Газ, поднимаясь снизу вверх по зигзагообразным каналам, образованным листами 1 и 2, взаимодействует со струями жидкости. После истечения с горизонтальной площадки струи жидкости и газа сначала движутся прямооточно, а затем, после удара о противоположную стенку, интенсивно перемешиваются, происходит диспергирование фаз. Это обеспечивает увеличение интенсивности массопереноса и повышение эффективности работы ударно-распылительной насадки. Таким образом, в новой насадке контакт фаз происходит не на поверхности насадки, а в ее объеме, в результате интенсивного перемешивания струй газа и жидкости. В каждой ступени насадки осуществляется прямоток, а в аппарате в целом – противоток. Ударно-распылительная насадка (рис. 1) занимает промежуточное положение между тарельчатыми и насадочными контактными устройствами. С тарельчатыми устройствами ее сближает то, что в объеме насадки в нижней части ромбовидных (квадратных) каналов накапливается жидкость, которая играет роль гидрозатвора и одновременно принимает участие в массообмене. С насадочными устройствами новое контактное устройство объединяет то, что в нем осуществляется непрерывный контакт газа и жидкости и отсутствует межступенчатое пространство для отделения брызг от газа.

Схема лабораторной установки для экспериментальных исследований ударно-распылительной насадки представлена на рис. 2. Элемент насадки 1 выполнен из прозрачного органического стекла для визуализации процесса. В ходе экспериментов рабочими средами были воздух, диоксид углерода и вода. Давление в элементе насадки 1 ат, температура 17 °С.

С целью снижения затрат на проведение исследований на данной установке (рис. 2) выполнены массообменные исследования элемента насадки, состоящего из двух смежных ступеней контакта. Исследованный элемент насадки схематично изображен на рис. 3. Он выполнен из оргстекла для визуализации процесса. Общая высота элемента насадки – 0,185 м, его протяженность – 0,195 м, сторона квадрата имеет длину 0,055 м. Эквивалентный диаметр элемента насадки составил 0,055 м, свободный объем – 0,82.

Проведена серия экспериментов, в ходе которой с заданным шагом изменялись расход воздуха и плотность орошения, определялась концентрация диоксида углерода в жидкости на входе и на выходе из насадки и затем рассчитывалось соответствующее значение объемного коэффициента массопередачи. В экспериментах расход воздуха менялся от 29 до 67 м³/ч, приведенная скорость газа составляла от 0,68 до 1,56 м/с, плотность орошения – от 29 до 184 м³/м²·ч. Значение расхода

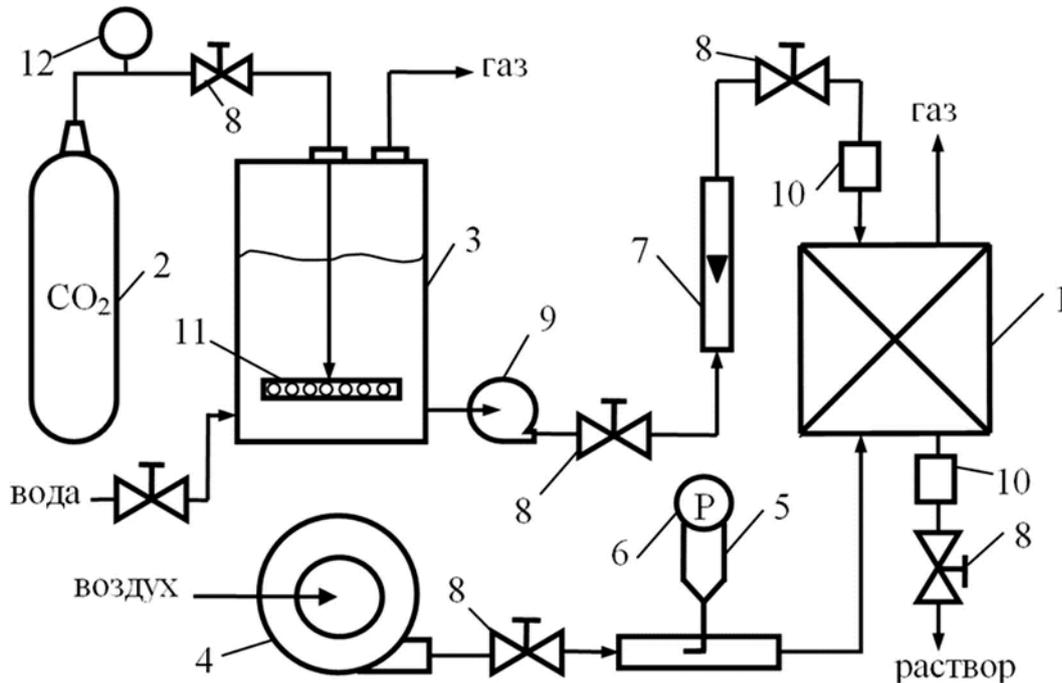


Рис. 2. Схема лабораторной установки для исследования ударно-распылительной насадки: 1 – элемент насадки; 2 – баллон с CO_2 ; 3 – ёмкость для насыщения воды CO_2 ; 4 – воздуходувка; 5 – трубка Пито-Прандтля; 6 – микроманометр; 7 – ротаметр; 8 – вентиль; 9 – насос; 10 – пробоотборник жидкости; 11 – барботёр; 12 – манометр

Fig. 2. Scheme of laboratory setup for studying the shock-spray packing: 1 is the packing element; 2 is the tank with CO_2 ; 3 is the capacity for CO_2 water saturation; 4 is the blower; 5 is the Pitot-Prandtl tube; 6 is the micromanometer; 7 is the rotameter; 8 is the valve; 9 is the pump; 10 is the fluid sampler; 11 is the bubbler; 12 is the manometer

воздуха ($\text{м}^3/\text{ч}$) определялось на основании показаний микроманометра 6, установленного на трубке Пито-Прандтля 5.

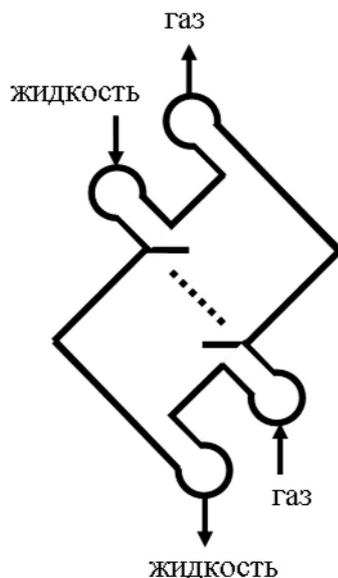


Рис. 3. Схема элемента ударно-распылительной насадки из двух ступеней контакта

Fig. 3. Scheme of the element of the shock-spray packing with two contact stages

Методика проведения экспериментов по определению объемных коэффициентов массопередачи состояла в следующем. Из баллона 2 в ёмкость с водой 3 через барботёр 11 подается газообразный диоксид углерода. Регулирование расхода диоксида углерода осуществляется с помощью вентилей 8. Вода в ёмкости 3 насыщается диоксидом углерода. Далее насосом 9 вода с растворенным в ней диоксидом углерода подается в качестве орошения на элемент насадки 1. Расход жидкости измеряется с помощью ротаметра 7. Из пробоотборников 10 на входе и выходе из элемента насадки отбираются пробы для анализа. Концентрацию углекислого газа в воде определяли путем титрования раствором гидроксида натрия (0,1 н) в присутствии фенолфталеина до получения розовой окраски, соответствующей окраске стандартного раствора, рН которого равен 8,4, по стандартной методике.

Расчет концентрации диоксида углерода в жидкости ($\text{мг}/\text{л}$) выполнялся по результатам титрования по формуле

$$C_{\text{ж}} = \frac{V_1 \cdot N \cdot Mr \cdot 500}{V_2},$$

где V_1 – объем раствора щелочи, пошедшего на титрование, мл; N – нормальность раствора; Mr – молекулярная масса диоксида углерода, кг/кмоль; V_2 – объем пробы, мл.

Концентрация диоксида углерода в потоке воздуха на выходе из элемента насадки определялась на основе материального баланса:

$$C_{г,кон} = \frac{L \cdot (C_{ж,нач} - C_{ж,кон})}{V} + C_{г,нач},$$

где $C_{г,кон}$ – конечная концентрация диоксида углерода в газе, мг/л; $C_{г,нач}$ – начальная концентрация диоксида углерода в газе, мг/л; L – объемный расход жидкости, м³/ч; V – объемный расход газа, м³/ч; $C_{ж,кон}$ – конечная концентрация диоксида углерода в жидкости, мг/л; $C_{ж,нач}$ – начальная концентрация диоксида углерода в жидкости, мг/л.

При давлении 1 ат и температуре 20 °С равновесная концентрация диоксида углерода в жидкости связана с концентрацией в газе соотношением

$$C_{ж}^* = \gamma C_{г},$$

где γ – коэффициент распределения.

Движущую силу в верхней и нижней части насадки определяли по уравнению

$$\Delta_{в(н)} = C_{ж} - C_{ж}^*,$$

где $\Delta_{в(н)}$ – движущая сила соответственно в верхней и нижней части насадки.

Среднюю движущую силу процесса массопереноса определяли по формуле

$$\Delta = \frac{\Delta_{в} + \Delta_{н}}{2}.$$

Объемный коэффициент массоотдачи в жидкости (ч⁻¹) определяли по уравнению

$$K_v = \frac{M}{\Delta \cdot V_n},$$

где M – количество компонента, перенесенного через границу раздела фаз, кмоль/ч; Δ – движущая сила процесса, кмоль/м³; V_n – объем насадки, м³.

В результате экспериментов получена база данных по объемным коэффициентам массопереноса при различной приведенной скорости газа и плотности орошения.

На рис. 4 приведена зависимость объемного коэффициента массопереноса от плотности орошения при различных приведенных скоростях газа. На кривых рис. 4 наблюдаются два экстремума. Экстремальная зависимость объемного коэффициента массопереноса от плотности орошения объясняется сменой гидродинамических режимов, которые мы имели возможность наблюдать через стеклянные стенки насадки. Первый максимум возникает при плотности орошения приблизительно 50–70 м³/м²·ч. Возникновение данного максимума объясняется характером гидродинамического режима, при котором струя жидкости в ячейке распыляется потоком газа с образованием мелких капель, что приводит к увеличению поверхности контакта фаз и интенсивности массопереноса. Вторым максимумом возникает при плотности орошения более 110 м³/м²·ч. Он объясняется возникновением ударно-струйного гидродинамического режима, при котором струя жидкости распыляется пото-

ком газа и ударяется о стенку насадки, обеспечивая эффективное перемешивание фаз. Снижение интенсивности массопереноса при дальнейшем увеличении плотности орошения объясняется возникновением режима захлебывания. Таким образом, в ходе экспериментов на ударно-распылительной насадке наблюдались четыре гидродинамических режима: струйный режим (при плотностях орошения 29–50 м³/м²·ч); распылительный режим (50–70 м³/м²·ч); ударно-распылительный режим (70–165 м³/м²·ч при приведенной скорости газа 1,4–1,56 м/с); режим захлебывания (плотность орошения более 165 м³/м²·ч при приведенной скорости газа 1,4–1,56 м/с).

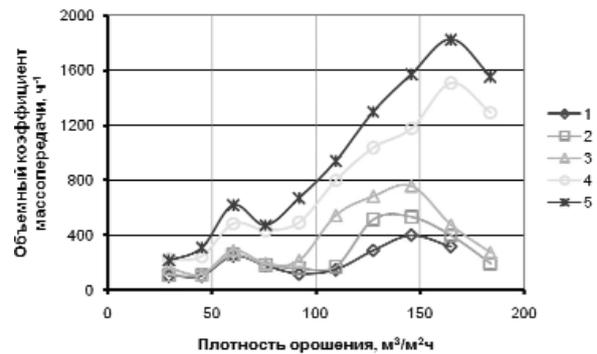


Рис. 4. Зависимость объемного коэффициента массопереноса от плотности орошения. Приведенная скорость газа: 1 – 0,68; 2 – 0,98; 3 – 1,21; 4 – 1,40; 5 – 1,56 м/с

Fig. 4. Dependence of the mass transfer volumetric coefficient on irrigation density. The superficial gas velocity is: 1) 0,68; 2) 0,98; 3) 1,21; 4) 1,40; 5) 1,56 m/s

На рис. 5 приведена зависимость объемного коэффициента массопереноса от приведенной скорости газа при различных плотностях орошения.

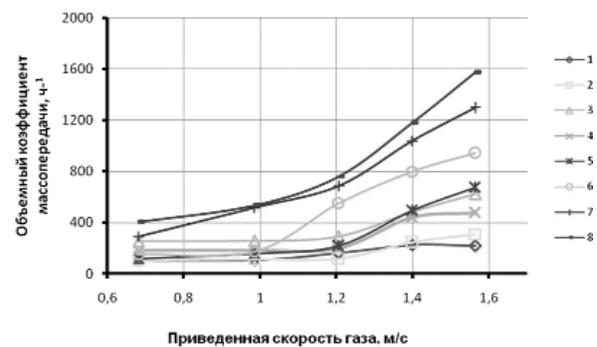


Рис. 5. Зависимость объемного коэффициента массопереноса от приведенной скорости газа. Плотность орошения: 1 – 29,12; 2 – 44,98; 3 – 60,14; 4 – 75,68; 5 – 91,84; 6 – 109,54; 7 – 127,56; 8 – 145,89 м³/м²·ч

Fig. 5. Dependence of the mass transfer volumetric coefficient on the superficial gas velocity. The irrigation density is: 1) 29,12; 2) 44,98; 3) 60,14; 4) 75,68; 5) 91,84; 6) 109,54; 7) 127,56; 8) 145,89 m³/m²·h

Как видно из рис. 5, объемный коэффициент массопереноса возрастает при увеличении приведенной скорости газа при всех плотностях орошения. Это объясняется тем, что при увеличении приведенной скорости газа возрастает турбулент-

ность газового потока и, как следствие, возрастает поверхность контакта фаз и коэффициенты массоотдачи в жидкости. Это приводит к увеличению интенсивности массопереноса диоксида углерода из жидкой фазы в газовую.

На рис. 6 представлено сравнение интенсивности массопереноса на новой ударно-распылительной насадке с интенсивностью массопереноса на других известных насадках, применяющихся в настоящее время для проведения процесса десорбции диоксида углерода из воды.

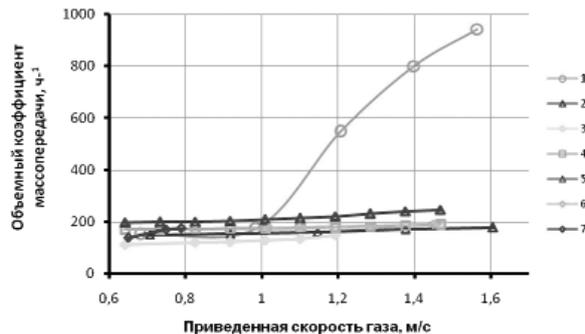


Рис. 6. Зависимость объемного коэффициента массопередачи от приведенной скорости газа на различных насадках: 1 – ударно-распылительная насадка, плотность орошения $109,54 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$; 2 – кольца Палля, $d_s=0,04 \text{ м}$, плотность орошения $100 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$ [18]; 3 – насадка Инталокс, $d_s=0,05 \text{ м}$, плотность орошения $100 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$ [18]; 4 – насадка ГИАП-НЗ, $d_s=0,05 \text{ м}$, плотность орошения $100 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$ [18]; 5 – насадка ГИАП-НЗ, $d_s=0,038 \text{ м}$, плотность орошения $100 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$ [18]; 6 – цепная насадка, $d_s=0,007 \text{ м}$, плотность орошения $111 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$ [1]; 7 – кольца Рашига, $d_s=0,007 \text{ м}$, плотность орошения $111 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$ [1]

Fig. 6. Dependence of the volumetric coefficient of mass transfer on superficial gas velocity at various packings: 1 is the shock-spray packing, irrigation density is $109,54 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$; 2 is the Pall rings, $d_s=0,04 \text{ м}$, the irrigation density is $100 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$ [18]; 3 is the Intaloks packing, $d_s=0,05 \text{ м}$, the irrigation density is $100 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$ [18]; 4 is the GIAP H3 packing, $d_s=0,05 \text{ м}$, the irrigation density is $100 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$ [18]; 5 is the GIAP H3 packing, $d_s=0,038 \text{ м}$, the irrigation density is $100 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$ [18]; 6 is the chain packing, $d_s=0,007 \text{ м}$, the irrigation density is $111 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$ [1]; 7 is the Raschig rings, $d_s=0,007 \text{ м}$, the irrigation density is $111 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$ [1]

Анализ рис. 6 показывает, что при приведенной скорости газа $1,21\text{--}1,56 \text{ м/с}$ объемный коэффициент массопередачи в $2,49\text{--}3,33$ раза превышает объемный коэффициент массопередачи на насадке ГИАП-НЗ, $d=0,038 \text{ м}$. Это объясняется созданием высокоэффективного ударно-распылительного гидродинамического режима в новой насадке при данных скоростях газа и плотностях орошения. При ударно-распылительном режиме формируется развитая поверхность контакта фаз и интенсивное перемешивание, что обеспечивает существенное увеличение интенсивности массопереноса.

Ранее было установлено, что ударно-распылительная насадка обладает достаточно хорошими гидравлическими характеристиками [20]. Результаты работы [20], а также данные, представленные

на рис. 6, показывают, что новая ударно-распылительная насадка является перспективной для разделения систем газ–жидкость в различных производствах.

Выводы

1. Новая ударно-распылительная насадка характеризуется простотой конструкции, компактностью и высокой интенсивностью массопереноса в газожидкостных системах. Экспериментально доказано, что объемный коэффициент массопередачи при десорбции диоксида углерода из воды на новой насадке в $2,49\text{--}3,33$ раза превышает объемный коэффициент массопередачи на насадке ГИАП-НЗ, которая до настоящего времени обеспечивала самую высокую интенсивность десорбции диоксида углерода. Высокая интенсивность массопереноса на новой насадке объясняется формированием высокоэффективного ударно-распылительного гидродинамического режима с развитой поверхностью контакта фаз. Это позволяет рекомендовать ударно-распылительную насадку для проведения газожидкостных массообменных процессов, таких как абсорбция, десорбция, ректификация и др.
2. Показано, что в зависимости от плотности орошения и приведенной скорости газа на ударно-распылительной насадке возникают четыре гидродинамических режима: струйный режим (при плотностях орошения $29\text{--}50 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$); распылительный режим ($50\text{--}70 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$); ударно-распылительный режим ($70\text{--}165 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$ при приведенной скорости газа $1,4\text{--}1,56 \text{ м/с}$); режим захлебывания (плотность орошения более $165 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$ при приведенной скорости газа $1,4\text{--}1,56 \text{ м/с}$).
3. Установлено, что зависимость объемного коэффициента массопередачи на ударно-распылительной насадке от плотности орошения имеет экстремальный характер. Возникновение максимумов объясняется свойствами возникающих гидродинамических режимов, при которых обеспечивается развитая поверхность контакта фаз и высокая интенсивность массопереноса.
4. Объемный коэффициент массопередачи возрастает при увеличении приведенной скорости газа при всех плотностях орошения и достигает $1572,9 \text{ ч}^{-1}$ при скорости газа $1,56 \text{ м/с}$ и плотности орошения $145,89 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$. Высокое значение объемного коэффициента массопередачи объясняется тем, что при увеличении приведенной скорости газа возрастает турбулентность газового потока и, как следствие, возрастает поверхность контакта фаз и коэффициенты массоотдачи в жидкости.
5. Экспериментально определенные коэффициенты массопередачи могут быть использованы при проектировании промышленных десорбционных аппаратов с новой ударно-распылительной насадкой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рыжов С.О. Интенсификация десорбции диоксида углерода из водных растворов на высокоэффективной регулярной насадке: автореф. ... дис. канд. тех. наук. – Томск, 2013. – 21 с.
2. On the modeling of gas-phase mass-transfer in metal sheet structured packings / F.J. Rejl, L. Valenz, J. Haidl, M. Kordač, T. Moucha // Chemical Engineering Research and Design. – 2015. – № 93. – P. 194–202.
3. Моделирование процесса абсорбции аммиака и метиламинов водой на новой регулярной насадке / М.В. Андреев, И.В. Скачков, А.В. Бальчугов, В.В. Коробочкин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 6. – С. 69–78.
4. Рамм В.М. Абсорбция газов. – М.: РГБ, 2009. – 655 с.
5. Plate Efficiency in Rectification of Binary Mixtures in the Presence of an Inert Gas / I.A. Semenov, B.A. Ulyanov, D.N. Sitnikov, M.Yu. Fereferov // Russian Journal of Applied Chemistry. – 2011. – V. 84. – № 12. – P. 2071–2075.
6. Semenov I.A., Ulyanov B.A., Kulov N.N. Effect of Ultrasound on the Dissolution of Carbon Dioxide in Water // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2011. – V. 45. – № 1. – P. 21–25.
7. Каган А.М., Юдина Л.А., Пушнов А.С. О повышении предельно допустимых нагрузок при работе массообменных аппаратов с насадочными устройствами // Химическая промышленность. – 2001. – № 4. – С. 46–48.
8. Hydraulic and mass-transfer characteristics of Raschig Super-Pak 250Y / F.J. Rejl, L. Valenz, J. Haidl, M. Kordač, T. Moucha // Chemical Engineering Research and Design. – 2015. – № 99. – P. 20–27.
9. Скачков И.В., Бальчугов А.В., Рыжов С.О. Гидродинамические исследования технологии газожидкостных процессов на новой регулярной насадке // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2012. – № 3 (35). – С. 147–150.
10. Simulation of a Distillation Column with Nonequimolar Mass Transfer in the Production of Methylamines / I.A. Semenov, B.A. Ulyanov, D.A. Dubrovskii, N.N. Kulov // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2014. – V. 48. – № 5. – P. 644–649.
11. Исследование гидродинамики регулярных насадок из сетчатых наклонных цилиндров для осуществления тепло- и массообменных процессов / М.В. Шилин, М.Г. Беренгартен, А.С. Пушнов, М.И. Ключенкова // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2012. – № 10. – С. 10–13.
12. Diego D.D. Pinto, Rob Emonds, Geert F. Versteeg. Experimental Determination of Mass-transfer Coefficients and Area of Dumped Packing Using Alkanolamine Solvents // Energy Procedia. – 2016. – № 86. – P. 219–228.
13. Расчет гидродинамических параметров регулярных структурированных насадок / Г.Б. Дмитриева, М.Г. Беренгартен, М.И. Ключенкова, А.С. Пушнов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2005. – № 12. – С. 5–9.
14. Rzehak R., Krepper E. Euler-Euler simulation of mass-transfer in bubbly flows // Chemical Engineering Science. – 2016. – V. 155. – № 22. – P. 459–468.
15. Semenov I.A., Pokrovskaya M.A. Estimating the parameters of γ -models for binary mixtures from surface tension data // Theoretical foundations of chemical engineering. – 2014. – № 1. – P. 90–95.
16. Бальчугов А.В., Васильев А.В., Кузора И.Е. Регулярная насадка для тепло- и массообменных аппаратов: пат. Российская Федерация № 2452560; заявл. 28.02.2011; опубл. 10.06.2012, Бюл. № 16. – 3 с.
17. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. – М.: Альянс, 2007. – 576 с.
18. Каган А.М., Юдина Л.А., Пушнов А.С. Нерегулярная металлическая насадка ГИАП-НЗ и некоторые аспекты ее промышленного использования // Химическая промышленность. – 2001. – № 5. – С. 43–46.
19. Коэффициенты массоотдачи в жидкости при растворении пузырьков углекислоты в условиях акустических воздействий / Е.В. Подоплелов, И.А. Семёнов, В.В. Бизимов, А.И. Лушев // Современные технологии и научно-технический прогресс. – 2009. – № 1. – С. 27.
20. Гидравлические испытания двух модификаций элемента регулярной насадки / М.В. Андреев, Д.Н. Игнатьев, Т.Н. Мусева, А.В. Бальчугов // Химия и химическая технология: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. – Ангарск, 2016. – С. 3–6.

Поступила 30.09.2016 г.

Информация об авторах

Андреев М.В., аспирант кафедры машин и аппаратов химических производств Ангарского государственного технического университета.

Бальчугов А.В., доктор технических наук, проректор по научной работе Ангарского государственного технического университета.

Дубровский Д.А., кандидат технических наук, начальник центральной лаборатории ИЦ-УКК ОАО «Ангарская нефтехимическая компания».

Коробочкин В.В., доктор технических наук, профессор кафедры общей химии и химической технологии Института физики высоких технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 66.021

MASS TRANSFER EFFICIENCY OF SHOCK-SPRAY PACKING

Matvey V. Andreenko¹,
nir@angtu.ru

Alexey V. Balchugov¹,
balchug@mail.ru

Dmitriy A. Dubrovsky²,
dubrovskiyda@inbox.ru

Valeriy V. Korobochkin³,
vkorobochkin@tpu.ru

¹ Angarsk State Technical University,
60, Tchaikovsky street, Angarsk, 665835, Russia.

² Joint-stock company «Angarsk petrochemical company»,
Angarsk, 665830, Russia, PO box 65.

³ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

Relevance of the work is caused by the need to intensify mass transfer in gas-liquid systems for reducing the dimensions of industrial apparatus and decreasing harmful emissions into the environment.

The main aim of the study is to determine experimentally the volumetric coefficient of mass transfer in carbon dioxide desorption from water into the air stream on a new shock-spray packing at different relative gas velocity and irrigation density and to compare the efficiency of the shock-spray packing with the known ones based on the experimental data obtained.

The methods used in the study: experimental determination of the volumetric coefficients of mass transfer using the material balance and mass transfer equations, direct titration, instrumental definition of gas and liquid flow rates.

The results. The authors have obtained the experimental data base on the volumetric coefficients of mass transfer at carbon dioxide desorption from water in a wide range of superficial gas velocities and irrigation densities in the new regular shock-spray packing. It was found out that the dependence of the volumetric mass transfer coefficient in the shock-spray packing on irrigation density is extreme. The appearance of maxima is explained by the properties of arising hydrodynamic regimes, which provide the developed surface of phase contact and high intensity of mass transfer. It is shown that, depending on the irrigation density and superficial gas velocity on the shock-spray packing, four hydrodynamic regimes: jet, spray, shock-spray and flooding, occur. It was shown that when the gas superficial velocity is 1,21–1,56 m/s the volumetric mass transfer coefficient in the shock-spray packing exceeds in 2,49–3,33 times the volumetric mass transfer coefficient on the packing GIAP H3 (equivalent diameter $d_e=0,038$ m). This fact is explained by hydrodynamic regime in the new packing shock-spray. It is shown that the new shock-spray packing is prospective for gas-liquid processes in chemical industry.

Key words:

Mass transfer, carbon dioxide desorption from water, shock-spray packing, mass transfer intensity, volumetric coefficient of mass transfer.

REFERENCES

1. Ryzhov S.O. *Intensifikatsiya desorbtsii dioksida ugleroda iz vodnykh rastvorov na vysokoeffektivnoy regulyarnoy nasadke*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk. [Intensification of carbon dioxide stripping from aqueous solutions for highly regular packing. Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 2013. 21 p.
2. Rejl F.J., Valenz L., Haidl J., Kordač M., Moucha T. On the modeling of gas-phase mass-transfer in metal sheet structured packings. *Chemical Engineering Research and Design*, 2015, no. 93, pp. 194–202.
3. Andreenko M.V., Skachkov I.V., Balchugov A.V., Korobochkin V.V. Modeling of ammonia and methylamines absorption with water on a new regular packing. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 6, pp. 69–78. In Rus.
4. Ramm V.M. *Absorbciya gazov* [Absorption of gases]. Moscow, RGB Publ., 2009. 655 p.
5. Semenov I.A., Ulyanov B.A., Sitnikov D.N., Fereferov M.Yu. Plate Efficiency in Rectification of Binary Mixtures in the Presence of an Inert Gas. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2011, vol. 84, no. 12, pp. 2071–2075.
6. Semenov I.A., Ulyanov B.A., Kulov N.N. Effect of Ultrasound on the Dissolution of Carbon Dioxide in Water. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2011, vol. 45, no. 1, pp. 21–25.
7. Kagan A.M., Yudina L.A., Pushnov A.S. O povyshenii predelno dopustimyykh nagruzok pri rabote massoobmennyykh apparatov s nasadochnymi ustroystvami [On increasing the maximum permissible load at operation of mass transfer devices with packed devices]. *Khimicheskaya promyshlennost*, 2001, no. 4, pp. 46–48.
8. Rejl F.J., Valenz L., Haidl J., Kordač M., Moucha T. Hydraulic and mass-transfer characteristics of Raschig Super-Pak 250Y. *Chemical Engineering Research and Design*, 2015, no. 99, pp. 20–27.
9. Skachkov I.V., Balchugov A.V., Ryzhov S.O. Hydrodynamic studies of gas-liquid technology in a new regular packing. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie*, 2012, no. 3 (35), pp. 147–150. In Rus.
10. Semenov I.A., Ulyanov B.A., Dubrovskii D.A., Kulov N.N. Simulation of a Distillation Column with Nonequimolar Mass Transfer in the Production of Methylamines. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2014, vol. 48, no. 5, pp. 644–649.

11. Shilin M.V., Berengarten M.G., Pushnov A.S., Klyushenkova M.I. Study of hydrodynamics of regular the packing of inclined mesh cylinders for heat and mass transfer. *Chemical and petroleum engineering*, 2012, no. 10, pp. 10–13. In Rus.
12. Diego D.D. Pinto, Rob Emonds, Geert F. Versteeg. Experimental Determination of Mass-transfer Coefficients and Area of Dumped Packing Using Alkanolamine Solvents. *Energy Procedia*, 2016, no. 86, pp. 219–228.
13. Dmitrieva G.B., Berengarten M.G., Klyushenkova M.I., Pushnov A.S. Calculation of hydrodynamic parameters of regular structured packing. *Chemical and petroleum engineering*, 2005, no. 12, pp. 5–9. In Rus.
14. Rzehak R., Krepper E. Euler-Euler simulation of mass-transfer in bubbly flows. *Chemical Engineering Science*, 2016, no. 22, pp. 459–468.
15. Semenov I.A., Pokrovskaya M.A. Estimating the parameters of γ -models for binary mixtures from surface tension data. *Theoretical foundations of chemical engineering*, 2014, no. 1, pp. 90–95.
16. Balchugov A.V., Vasilev A.V., Kuzora I.E. *Regulyarnaya nasadka dlya teplo- i massoobmennykh apparatov* [Regular packing for heat and mass transfer devices]. Patent RF no. 2452560, 2012.
17. Pavlov K.F., Romankov P.G., Noskov A.A. *Primery i zadachi po kursu protsessov i apparatov khimicheskoy tekhnologii* [Examples and problems in the processe and apparatus of chemical technology course]. Moscow, Alyans Publ., 2007. 576 p.
18. Kagan A.M., Yudina L.A., Pushnov A.S. Neregulyarnaya metallicheskaya nasadka GIAP-N3 i nekotorye aspekty ee promyshlennogo ispolzovaniya [Irregular metal packing GIAP-H3 and some aspects of its industrial use]. *Khimicheskaya promyshlennost*, 2001, no. 5, pp. 43–46.
19. Podoplelov E.V., Semenov I.A., Bizimov V.V., Lushev A.I. Mass transfer coefficients in liquid when dissolving carbon dioxide bubbles under acoustic effects. *Sovremennye tekhnologii i nauchno-tekhnicheskyy progress*, 2009, no. 1, p. 27. In Rus.
20. Andreenko M.V., Ignatev D.N., Museva T.N., Balchugov A.V. Gi-dravlicheskie ispytaniya dvukh modifikatsy elementa regul'yarnoy nasadki [Hydraulic testing of two modifications of the regular packing element]. *Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya: Materialy Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Proceedings of the All-Russia scientific-technical conference. Chemistry and chemical technology]. Angarsk, 2016. pp. 3–6.

Received: 30 September 2016.

Information about the authors

Matvey V. Andreenko, postgraduate student, Angarsk State Technical University.

Alexey V. Balchugov, Dr. Sc., Vice-rector for research, Angarsk State Technical University.

Dmitriy A. Dubrovsky, Cand. Sc., the head of the Joint-stock company «Angarsk petrochemical company».

Valeriy V. Korobochkin, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.